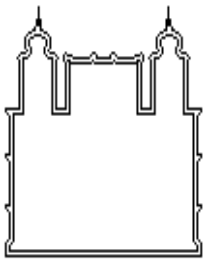


MINISTÉRIO DA SAÚDE

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ

ESCOLA NACIONAL DE SAÚDE PÚBLICA

Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental

Curso de Especialização em Engenharia Sanitária e Controle Ambiental

TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO[1]

Rio de Janeiro
2001

[1] Autor: Marcelo Bessa de Freitas – Engenheiro Químico Sanitarista - Msc em Saneamento Ambiental – Doutorando em Saúde Pública

INTRODUÇÃO – O Ciclo Hidrológico

A água na natureza ocorre sob as formas sólida (neve, gelo, granizo), líquida (água de chuva) e gasosa (neblina), através do ciclo hidrológico (figura 1) que mantém esse sistema funcionando, a radiação solar faz a água evaporar do solo, dos rios da vegetação e dos oceanos, acumulando-se na atmosfera em forma de nuvens, ao precipitar sob a forma de chuva, neve e granizo formam as geleiras, rios, lagos, uma parte da água se infiltra no subsolo recarregando as reservas freáticas e rehidratando o solo. Os lençóis freáticos formados surgem na superfície através de nascentes, que disponibiliza água para vegetação terrestre e no processo de manutenção de todos os sistemas biológicos. Uma parte dessa água infiltrada no subsolo é reposta em direção dos rios, lagos e oceanos.

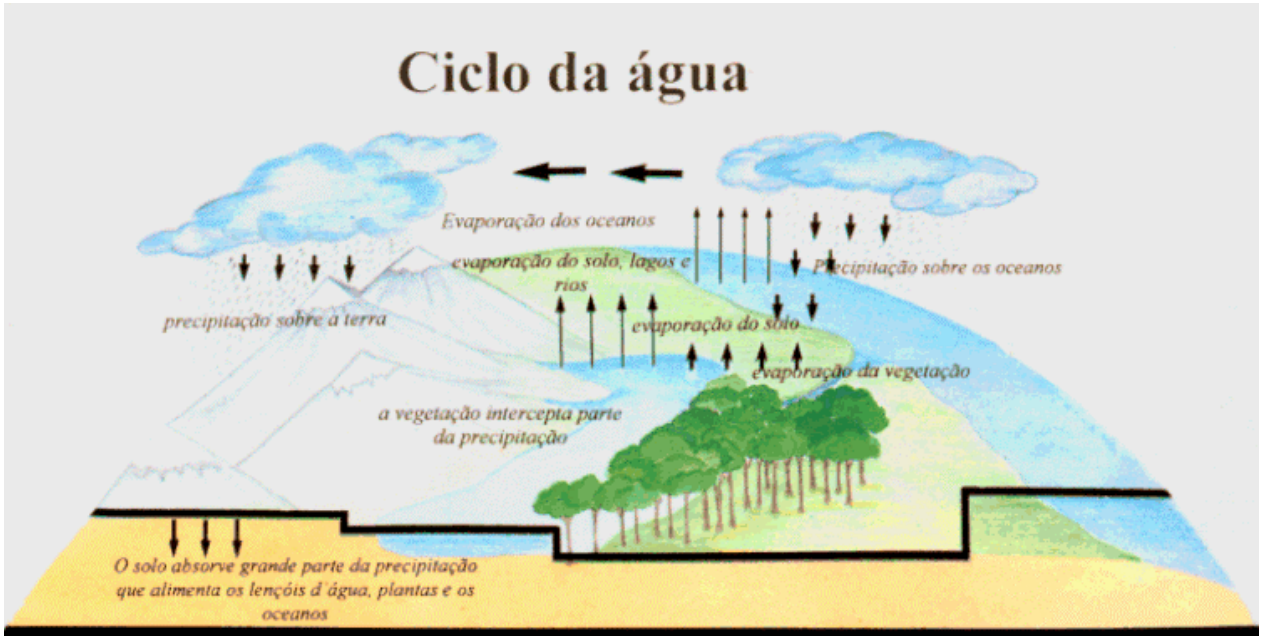
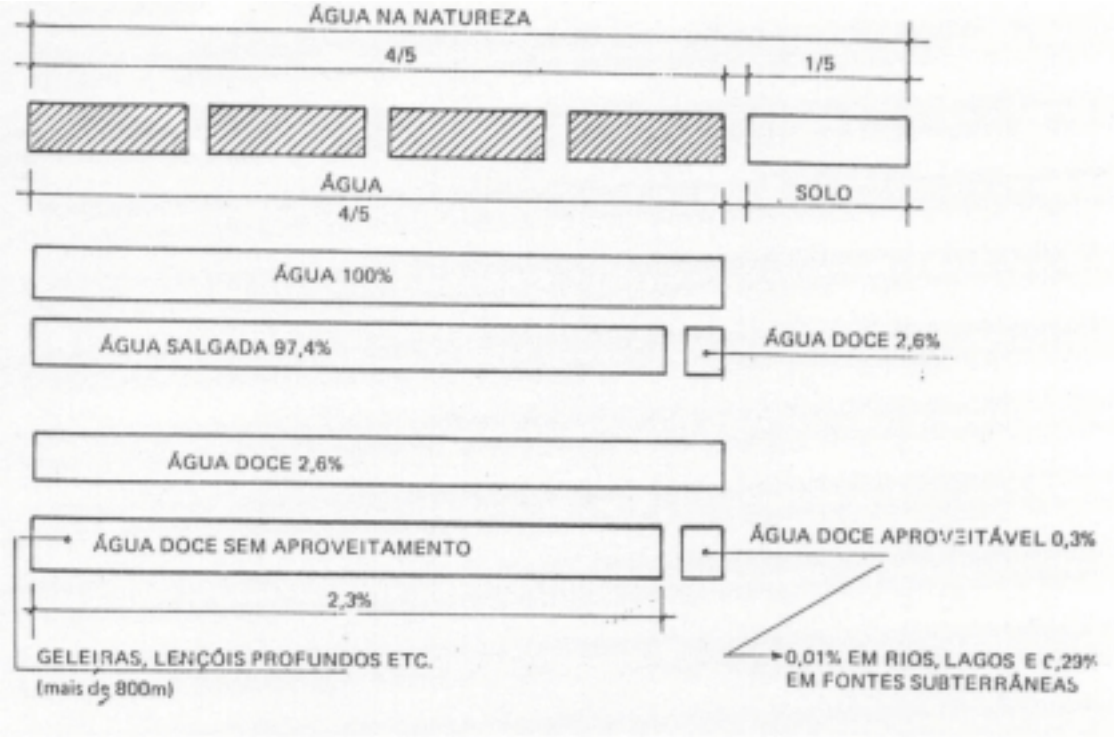

Ciclo da água
Evaporação dos oceanos
evaporação do solo, lagos e rios
Precipitação sobre os oceanos
precipitação sobre a terra
evaporação do solo
evapbração da vegetação
a vegetação intercepta parte da precipitação
O solo absorve grande parte da precipitação que alimenta os lençóis d água, plantas e os oceanos

Figura 1 – Ciclo Hidrológico
Fonte: Embrapa – Atlas Ambiental

De toda a água na natureza (figura 2), 97,4 % é salgada (mares e oceanos) e o restante, 2,6 % é representado pelos rios, lagos e fontes subterrâneas, ou seja, a superfície do planeta é de 510.000.000 km^2, e as águas correspondem a 70,8% desta superfície totalizando 361.000.000 km^2, no entanto, a maior parte desse percentual não tem um aproveitamento direto, pois formam as geleiras e lençóis profundos, onde a captação se torna economicamente inviável. Desse percentual aproveitável, cerca de 0,3 %, a maior parte está poluída ou não oferece condições

economicamente viáveis de tratamento. O Brasil possui 8% da reserva de água doce do mundo. Desse total, 80% encontra-se na Região Amazônica, onde se situa uma das mais extensas redes fluviais do mundo. Os 20% restantes distribuem-se nas demais regiões do país, onde está a grande maioria da população brasileira

Figura 2 – A Água na Natureza

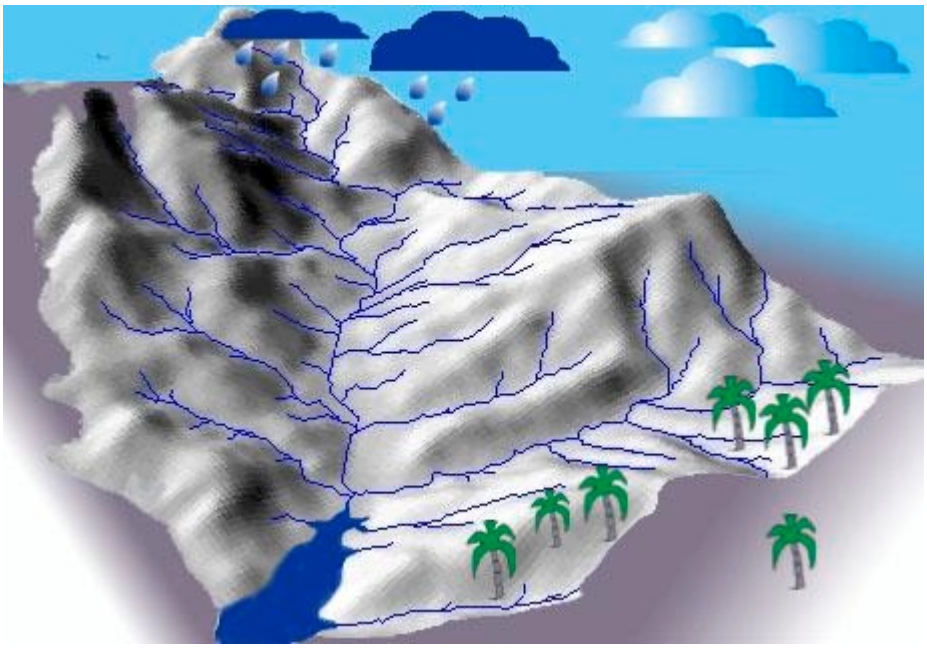


A água acumulada por efeito da infiltração em parte retorna à superfície na forma de nascentes e outra parte é restituída à atmosfera por meio da evapotranspiração . A vegetação tem importante função de acelerar o processo de evaporação, através da transpiração das superfícies das folhas, repondo o vapor d'água na atmosfera, de contribuir em parte para o equilíbrio do clima e da própria atmosfera, e também para a prevenção dos fenômenos de erosão provocados pela ação mecânica da água sobre o solo.

A bacia hidrográfica (figura 3) formada pelo ciclo hidrológico, é definida como sendo uma área drenada parcial ou totalmente por um ou vários cursos d'água. É na bacia hidrográfica onde ocorrem os maiores

impactos ambientais, provenientes da ocupação humana e suas mais diversas atividades, como exemplo os processos industriais, as atividades agrícolas, e a produção de rejeitos e dejetos humanos. A história da civilização humana se deu sempre ao longo dos corpos receptores, as grandes cidades se estabeleceram ao longo dos lagos e rios e mares.

Figura 3 – Bacia Hidrográfica



Fonte: Ministério do Meio Ambiente

Em relação às águas subterrâneas, a maior parte se origina da água da chuva a qual infiltra através da zona insaturada. Durante este processo a composição química da água é constantemente modificada pelas interações com os constituintes minerais da rocha e do solo (Silva Filho, 1993).

A água subterrânea, além de se um bem econômico, é considerada mundialmente uma fonte imprescindível de abastecimento de água de consumo humano, para as populações que não têm acesso à rede pública de abastecimento. Apesar da ausência de dados completos sobre as dimensões de sua utilização, estima-se que 51 % da água potável do Brasil provêm dos aqüíferos subterrâneos. No estado de São Paulo, existem registros de que 60 a 61 % dos núcleos urbanos se utilizam de águas subterrâneas para o abastecimento total ou parcial (CETESB, 1996; Forster & Hirata, 1993).

Os aqüíferos subterrâneos representam grande potencial de abastecimento para consumo humano e animal, além de utilização agrícola, principalmente nas áreas rurais de alguns países, como Brasil, Estados Unidos, Itália, Espanha, Nicarágua (Amaral et al., 1984) e Dinamarca (Laursen et al., 1994). No Brasil, o aqüífero subterrâneo abastece 6.549.363 domicílios, (19% do total) e destes, 68,78 % localizados na área rural, abrangendo 11,94 % de toda população nacional segundo o IBGE (1994).

O uso-benefício da água

O uso-benefício da água possui diversas finalidades que incluem:

Fins Domésticos: Bebidas, cozinha, banho lavagem de roupas e de utensílios, limpeza da casa, jardim;

Fins Comerciais: Restaurantes, bares, escritórios, etc.;

Fins Industriais: Utilizada na transformação de matéria prima, Irrigação;

Fins de Recreação: balneabilidade, recreação e prática esportiva;

Fins de Segurança: Combate a incêndios

Entretanto, o uso-benefício da água requer uma série de padrões de qualidade, de forma a atender as diversas finalidades, que se encontram na tabela 1.

Tabela 1 – Qualidade para Diversos Usos da Água

Usos da Água	Requisitos Principais
Agricultura	
Dessedentação de animais	Igual ao consumo humano
Irrigação de vegetais de consumo cru	Menos de 1.000 coliformes/100 mL ; menos de 1 ovo de nematodos intestinais/litro
Indústria	Variável, geralmente igual a água potável ou tratamento especial
Recreação e estética	Ausência de materiais flotante, sedimentáveis ou que produza odor, cor e turbidez objetáveis; ausência de substâncias tóxicas para a vida aquática e silvestre.
Recreação com contato	Além de cumprir com os requisitos estéticos, deve apresentar menos de 1.000 coliformes/100 mL e limites para vários parâmetros relativos à substâncias tóxicas.
Recreação sem contato	Semelhante aos requisitos estéticos
Aquicultura	Menos de 1.000 coliformes fecais/100 mL em tanques de peixes e eliminação de ovos de trematodos; mínimo de 5 mg/Litro de oxigênio dissolvido; ausência de petróleo e derivados e limite para outros parâmetros.
Outras espécies e vidas silvestres	Ausência de petróleo e derivados, limites para vários parâmetros.

Quantidade de Água para Consumo Humano

O volume de água necessário para abastecer uma determinada população é calculado levando em conta os seguintes componentes, representados na tabela 2.

Tabela 2 – Parcelas componentes da demanda de água de uma localidade

Demanda da Água		
Uso	Doméstico	asseio corporal descarga de bacias cozinha bebida lavagem de roupa rega de jardim e quintais limpeza geral lavagem de automóveis ar condicionado
	Comercial	bares lojas restaurantes cinemas, teatros, etc
	Industrial	matéria-prima processos resfriamento instalações hidro-sanitárias
	Público	limpeza de logradouros públicos irrigação de jardins fontes e bebedouros limpeza de rede de esgoto limpeza de galerias pluviais edifícios públicos piscinas públicas e recreação
	Especial	combate a incêndio instalações desportivas sistemas de transporte
Perdas		perdas na adução no tratamento na rede de distribuição perdas domiciliares
Desperdícios		desperdício de água nos pontos de consumo

O consumo médio diário em litro por habitante, ou consumo *per capta*, proveniente do cálculo das parcelas relativas ao uso, perdas e desperdícios nas cidades brasileiras varia em cada região, e depende de alguns fatores, tais como o clima; os hábitos e o nível de vida da

população; as atividades econômicas da cidade; a existência de medição de água distribuída; a pressão na rede de distribuição; os custos e a existência de sistemas de esgotamento sanitário. Alguns valores médios de consumo *per capta* de algumas cidades brasileiras encontram-se na tabela 3

Tabela 3 - Demandas médias de água para cidades brasileiras

Cidades	População (habitantes)	Consumo médio *per capta* litros/habitantes.dia
Menores	Até 5.000	100 a 150
Pequenas	5.000 a 25.000	150 a 200
Médias	25.000 a 100.000	200 a 250
Maiores	Acima de 100.000	250 a 300

Entretanto a água necessita apresentar além do aspecto quantitativo, uma certeza de qualidade e potabilidade para o seu devido consumo. Em relação às características qualitativas, a água pode ser encontrada como :

Água Bruta - água que é encontrada na natureza sob diversas formas;

Água Tratada - água que é submetida a algum tipo de tratamento (filtração, decantação, desinfecção), não necessariamente potável;

Água Potável - entende-se por água potável, aquela que pode ser consumida sem causar danos à saúde ou objeções de caráter organoléptico.

Para certificar e controlar a qualidade da água, existe uma norma governamental denominada Padrão de Potabilidade, que se define como um conjunto de valores máximos permissíveis, das características de qualidade da água, acima da qual ela é considerada não potável. O padrão aprovado pela norma brasileira, a Portaria 1469 do Ministério da Saúde, diz respeito ao limite máximo para cada elemento ou substância química, não considerando efeitos sinérgicos que possam ocorrer entre os elementos ou substâncias.

Padrões de Natureza Estética e Econômica e de Natureza Sanitária

Os padrões de potabilidade devem ser elaborados para atenderem aos seguintes aspectos fundamentais:

a) Oferecer aos consumidores uma água límpida de sabor agradável e inodora;

b) Impedir que a água distribuída contenha microrganismos patogênicos e substâncias pazes à saúde humana;

c) ser adequada à lavagem de roupas e utensílios, não agressivas às tubulações e acessórios hidráulicos e não incrustantes em instalações de água quente.

Padrões de Natureza Estética - São as substâncias ou características que conferem a água uma alteração organoléptica, ou seja, no gosto, na cor ou no cheiro. São eles: cor, turbidez, ferro, manganês, alcalinidade, dureza, pH, cloretos, sulfatos, cloro residual e flúor*

Padrões de Natureza Sanitária – São as substâncias ou microrganismos que podem causar algum dano à saúde do ser humano. Podem ser metais pesados (chumbo, cádmio, níquel, cromo), organoclorados, bactérias, vírus, algas, etc.

Impurezas Presentes na Água

A água possui várias impurezas, que são classificadas pelo seu tamanho e comportamento físico-químico, quando em solução na água. Essas impurezas podem estar presentes na forma particulada ($\phi > 1\mu m$), coloidal ($0{,}001\ \mu m < \phi < 1{,}0\ \mu m$) e dissolvida ($\phi < 0{,}001\ \mu m$).

ϕ - diâmetro

Forma Particulada ou em suspensão: areia, argila, silte, restos de planta e animais, bactérias e algas.

Materiais coloidais: argila, sílica (SiO_2), proteínas, compostos orgânicos e vírus ($0{,}003 < \phi < 0{,}3\ \mu m$).

Materiais dissolvidos: cátions (Na^+, Fe^{2+}, Al^{3+}), ânions(Cl^-, SO^{3-}_4), e gases (O_2, N_2, Ar)

Alguns padrões de potabilidade são mostrados na tabela 4 e5.

Tabela 4- Padrões de potabilidade – valores máximos permissíveis para aspectos organolépticos e que afetam a saúde

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP(1)
Alumínio	mg/L	0,2
Amônia (como NH_3)	mg/L	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor Aparente	uH(2)	15
Dureza	mg/L	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	mg/L	0,12
Odor		Não objetável(3)
Gosto		Não objetável(3)
Sódio	mg/L	200
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1.000
Sulfato	mg/L	250
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,05
Surfactantes	mg/L	0,5
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	UT(4) 5	5
Zinco	mg/L	5
Xileno	mg/L	0,3

NOTAS: (1) Valor máximo permitido.
(2) Unidade Hazen (mg Pt–Co/L).
(3) critério de referência
(4) Unidade de turbidez.

Tabela 5 - Padrão microbiológico de potabilidade da água para consumo humano

PARÂMETRO	VMP(1)
Água para consumo humano(2)	
Escherichia coli ou coliformes termotolerantes(3)	Ausência em 100ml
Água na saída do tratamento	
Coliformes totais	Ausência em 100ml
Água tratada no sistema de distribuição (reservatórios e rede)	
Escherichia coli ou coliformes termotolerantes(3)	Ausência em 100ml
Coliformes totais	Sistemas que analisam 40 ou mais amostras por mês: Ausência em 100ml em 95% das amostras examinadas no mês; Sistemas que analisam menos de 40 amostras por mês: Apenas uma amostra poderá apresentar mensalmente resultado positivo em 100ml

NOTAS:

(1) Valor Máximo Permitido.

(2) água para consumo humano em toda e qualquer situação, incluindo fontes individuais como poços, minas, nascentes, dentre outras.

(3) a detecção de *Escherichia coli* deve ser preferencialmente adotada.

A água para ser potável não deve conter nenhum microrganismo patogênico, ou substância química capaz de causar algum dano ao homem, deve também estar livre de bactérias que indicam poluição fecal. Para certificar que a água satisfaz os padrões e normas de potabilidade em qualidade bacteriológica e físico-química, é importante que as amostras sejam examinadas regularmente em relação aos indicadores de poluição fecal (coliformes totais e fecais) e físico-químicos (nitrato, pH, turbidez, cloro residual livre, ferro e fluoreto).

Os organismos recomendados são as bactérias do grupo coliforme. Uma vez que estão presentes em larga escala nas fezes do homem e outros animais de sangue quente, além de permitir sua detecção após consideráveis diluições. A presença de organismos coliformes fecais (termotolerantes), em particular *Escherichia coli*, fornece evidência definitiva de poluição fecal.

A presença de organismos coliformes em água de consumo foi relacionada com doenças e epidemias por diversos autores

Lippy & Waltrip, (1984), a partir de estudos de epidemias veiculadas pela água entre 1946 e 1980, categorizaram as principais deficiências que causaram ou contribuíram para essas epidemias: (1) uso de água superficial tratada ou não tratada; (2) uso de água subterrânea não tratada; (3) tratamento interrompido ou inadequado; (4) problemas na rede de distribuição; e (5) outros. Neste estudo concluiu-se que mais de 80% das epidemias foram associadas com deficiências no tratamento ou distribuição de água.

Tabela 6 - Doenças Relacionadas com o Consumo de Água Contaminada

Grupo de doenças	Formas de transmissão	Principais doenças	Formas de prevenção
feco-oral (não bacterianas)	Contato de pessoa a pessoa quando não se tem higiene pessoal adequada, o organismo patogênico (agente causador da doença) é ingerido	• poliomielite; • hepatite tipo B; • giardíase; • disenteria amebiana; • diarréias por vírus.	• implantar sistema de abastecimento de água; • melhorar as moradias e as instalações sanitárias; • promover a educação sanitária;
feco-oral (bacterianas)	Contato de pessoa a pessoa, ingestão e contato com alimentos contaminados e contato com fontes de água contaminadas com fezes	• febre tifóide e paratifóide; • diarréias e disenterias bacterianas, como a cólera.	• implantar sistema de abastecimento de água e de disposição dos esgotos; • melhorar as moradias e as instalações sanitárias; • promover a educação sanitária.

Fonte: Barros, T. de V. et alli - Manual de Saneamento Proteção Ambiental para os Municípios, V. 2

Tecnologias de Tratamento de Água

A história abastecimento de água para consumo humano surge inicialmente para satisfazer demandas relacionadas à captação, transporte e armazenamento, como conseqüência do aumento do consumo a partir do crescimento das cidades. Enquanto que o tratamento nasce primeiramente para satisfazer uma demanda estética em relação aos aspectos organolépticos presentes nas águas impuras. O primeiro sistema público de água de que se tem notícia, foi o aqueduto de Jerwan, construído na Assíria em 691 A.C. Na Antiga Roma, 97 A.C., reportou-se a existência de nove aquedutos abastecendo a cidade, com extensões variáveis de 16 Km até mais de 80 Km a uma capacidade de 221,9 milhões de litros por dia. Em

termos de remoção de impurezas, tem se- o registro de filtros egípcios e japoneses de louças, barro ou arenito, além dos Tanques de Aden na Arábia, 600 a. C., construídos pelos Romanos

Em 1582, é instalada a 1ª bomba no rio Tamisa para abastecer Londres, marcando a o início dos processos mecânicos de elevação em grandes cidades. A Invenção da máquina a vapor permitiu o emprego de bombas mais potentes e de maior capacidade e no séc. XIX, o abastecimento se desenvolveu com a fabricação de tubos de ferro, na Europa.

Em 1832, é construída a 1ª estação de tratamento de água nos EUA, e em 1958 já se fornecia água tratada para mais de 120 milhões de pessoas na América do Norte. Em 1854, a Inglaterra recomenda o uso de hipoclorito de cálcio para desodorizar águas residuárias e em 1887, tem início nos Estados Unidos, a desinfecção de águas utilizando compostos de cloro. A cloração como processo de tratamento no abastecimento público foi introduzida em 1902 pelo químico Maurício Duyk, em Middlekerk na Bélgica e usado até 1921. No Brasil, em 1926, a cidade de São Paulo passa a clorar toda água canalizada, e na cidade do Rio de Janeiro, a cloração tem início em 1934 (Rezende & Heller, 2002; Ramos, 1991).

O primeiro filtro lento foi construído por John Gibb na Escócia no séc. passado. No Brasil, uma das primeiras intervenções que se tem registro, em termos de remoção de impurezas, ocorreu em 1880 na cidade de Campos no Rio de Janeiro, onde foi instalado um sistema de filtração rápida.

Quando a água destinada para o consumo humano, não estiver dentro dos padrões de potabilidade, é necessário o emprego de um tratamento físico e físico-químico a fim de se remover todas as impurezas presentes.

O tratamento pode ser domiciliar, simples, convencional ou avançado. Quando a água é fornecida por uma companhia de abastecimento, ela deve captar e tratar a água e distribui-la de acordo com o padrão de potabilidade estabelecido na portaria 1469 do Ministério da Saúde. As tecnologias de tratamento empregadas variam em função do tipo de água. Quanto mais vulnerável e comprometida por fontes de poluição pontual (lançamento de esgotos municipais e industriais) e difusa (atividades agrícolas que lançam

pesticidas no ambiente), maior é a concentração de impurezas presentes na água e portanto maior é a classe (tabela 7) do corpo hídrico, necessitando de tratamento mais complexo e de custo mais alto.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da Resolução *nº 20 de 15 de junho de 1986*, estabelece uma classificação (ver tabela 7) baseada na qualidade da água a ser captada para fins de tratamento, em função dessa qualidade é necessário o emprego do tratamento, para a remoção das impurezas químicas e biológicas presentes na água, a fim de torná-la potável para o consumo humano.

Tabela 7 – Classificação de corpos hídricos e tratamento requerido

Classificação	*tratamento requerido*
classe especial	**desinfecção**
classe 1	**simplificado**
classe 2	**convencional**
classe 3	**convencional**

Segundo a ABNT, através da NBR-12216, classifica as águas em quatro tipos:

Tipo A: águas subterrâneas ou superficiais, provenientes de bacias sanitariamente protegidas;

Tipo B: águas subterrâneas ou superficiais, provenientes de bacias não protegidas;

Tipo C: águas superficiais provenientes de bacias não protegidas;

Tipo D: águas superficiais provenientes de bacias não protegidas, sujeitas à poluição e requerem tratamentos especiais para atender o Padrão de Potabilidade.

E para cada tipo, recomenda um tratamento específico, e a tecnologia empregada pode ser:

Tipo A: desinfecção e correção do pH;

Tipo B: desinfecção, correção do pH, decantação simples e filtração precedida ou não de decantação, para águas de turbidez natural, medida na entrada do filtro sempre inferiores a 40 UNT e cor aparente inferior a 20 UH;

Tipo C: coagulação, seguida ou não da decantação, filtração rápida, desinfecção e correção do pH;

Tipo D: idem tipo C e complementar apropriado a cada caso

Tabela 8 - Características básicas segundo a NB-12216 da ABNT, para parâmetros físico-químicos, químicos e microbiológicos

Característica básica	tipo A	tipo B	tipo C	tipo D
DBO_5 (mg/L)				
média	< 1,5	1,5 - 2,5	2,5 - 4,0	> 4,0
máxima	3,0	4,0	6,0	>6,0
coliformes totais (NMP/100 mL)				
média mensal	50 - 100	100 - 5000	5000-20000	> 20000
máximo	> 100*	>5000**	>20000***	-----
pH	5 - 9	5 - 9	5 - 9	3,8 - 10,3
cloretos (mg/L)	< 50	50 - 250	250 - 600	> 600
fluoretos (mg/L)	< 1,5	1,5 - 3,0	> 3,0	-----

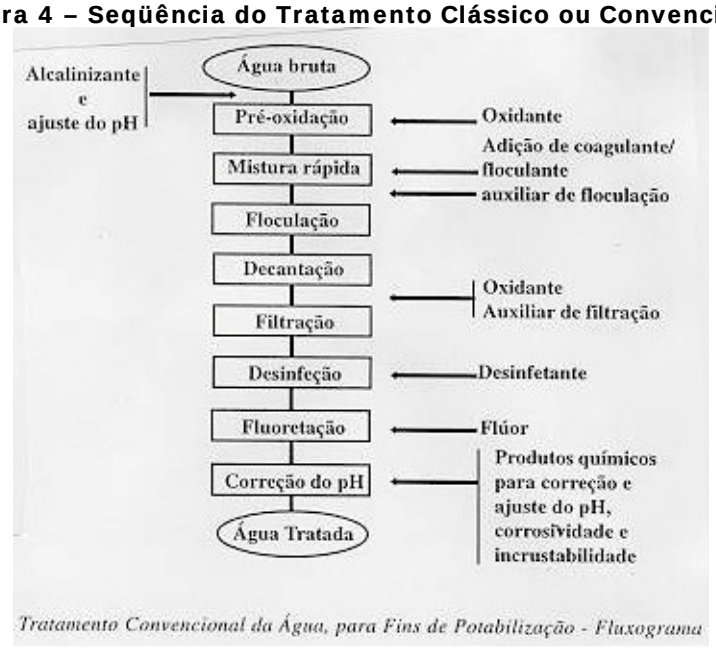
(*) em menos de 5 % das amostras examinadas
(**) em menos de 20 % das amostras examinadas
(***) em menos de 5 % das amostras examinadas

A desinfecção consiste na remoção de microrganismo patogênicos, através de um agente químico (cloro, ozônio, iodo, permanganato de potássio) ou de um agente físico (calor, ou radiação ultra violeta). As estações de tratamento de água geralmente usam cloro gasoso como agente desinfetante.

No tratamento simplificado a água além de sofrer uma desinfecção, é submetida a uma filtração, que pode ser lenta, geralmente em águas com baixa turbidez; ou rápida, utilizada em águas com turbidez mais alta, esta última é quase sempre precedida por uma decantação química ou simples.

No tratamento convencional (figura 4), a água para ficar límpida requer a introdução de uma agente químico (sulfato de alumínio, cloreto férrico e polieletrólitos), chamado de coagulante que serve para remover as impurezas, representadas em sua maior parte pelas partículas coloidais. Essas partículas necessitam ser desestabilizadas e aglutinadas umas às outras, formando flocos que serão sedimentados nos decantadores e removidos na filtração. A coagulação é efetuada em uma unidade de mistura rápida, enquanto que a aglutinação é efetuada em uma unidade de mistura lenta ou floculadores.

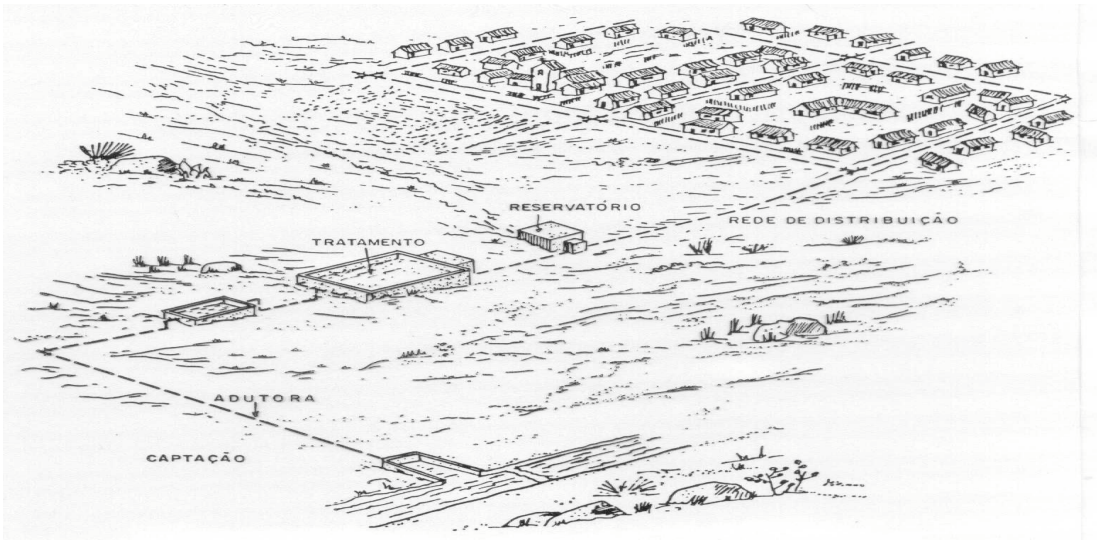
Figura 4 – Seqüência do Tratamento Clássico ou Convencional



Fonte: Di Bernardo (1999)

O sistema de abastecimento de água (figura 5) de uma cidade é iniciado na captação, onde ocorre a tomada d'água que segue para o tratamento, após a remoção das impurezas, a água é armazenada em reservatórios onde em seguida é distribuída à população através de adutoras e malhas de rede. Essa distribuição pode realizada por meio de bombas ou por gravidade.

Figura 5 – Sistema de Abastecimento de Água



Fonte: Manual de Saneamento Básico - Funasa

Variação da qualidade da água e Tecnologia de Tratamento

Os mananciais hídricos superficiais utilizados para fins de abastecimento humano sofrem variação ao longo do ano. Essa variação é está associada a fatores geoclimáticos (cheias e estiagens de rios e reservatórios) e antropogênicos (poluição industrial, agrícola e urbana). A tecnologia empregada para o tratamento será determinada em função das características físico-químicas, químicas e microbiológicas destes mananciais de superfície. Assim como os custos de tratamento e pessoal qualificado para operar as plantas de potabilização. As figuras 6 e 7 relacionam variação mensal da qualidade da água bruta e produtos químicos utilizados numa ETA convencional. De acordo com estes gráficos pode constatar facilmente que nos períodos de maior precipitação pluviométrica, há um custo maior no tratamento, e um maior atividade do processo operacional.

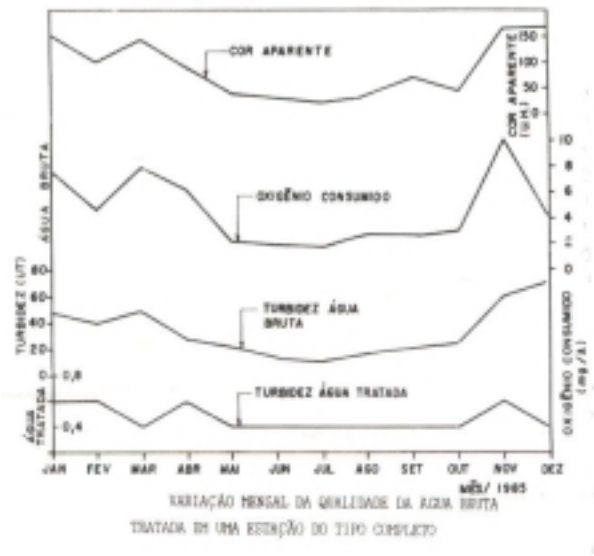
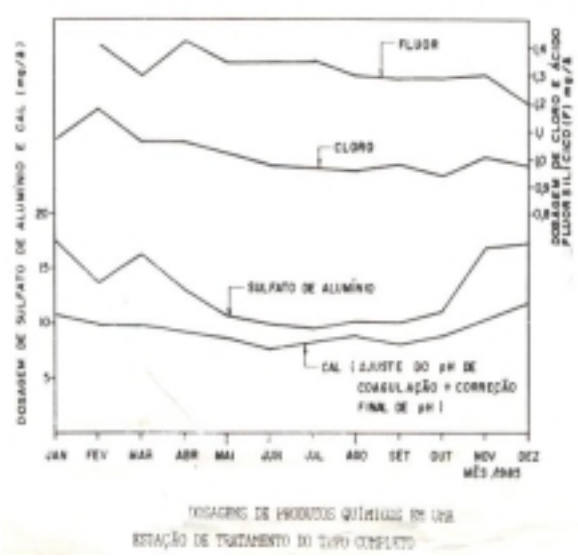

COR APARENTE
OXIGÊNIO CONSUMIDO
TURBIDEZ ÁGUA BRUTA
TURBIDEZ ÁGUA TRATADA
JAN FEV MAR ABR MAI JUN JUL AGO SET OUT NOV DEZ
MÊS/ 1985
VARIAÇÃO MENSAL DA QUALIDADE DA AGUA BRUTA
TRATADA EM UMA ESTAÇÃO DO TIPO COMPLETO

Figura 6 – Variação mensal da qualidade da água bruta de um ETA convencional


FLUOR
CLORO
SULFATO DE ALUMÍNIO
CAL (AJUSTE DO pH DE COAGULAÇÃO + CORREÇÃO FINAL DE pH)
JAN FEV MAR ABR MAI JUN JUL AGO SET OUT NOV DEZ
MÊS /1985
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO TIPO COMPLETO

Variação de consumo mensal de produtos químicos de uma ETA convencional

COAGULAÇÃO - FLOCULAÇÃO

Uma grande variedade de substâncias encontradas em águas poluídas e que provocam turbidez, não é capaz de decantar, como por exemplo, compostos que causam coloração, partículas de argilas, microrganismos, matéria orgânica, etc. O objetivo da coagulação é desestabilizar a suspensão coloidal hidrófoba. A coagulação pode ser representada por dois fenômenos fundamentais:

1- Químico: reação do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, depende do pH final da mistura e da concentração do metal.

2- Físico: transporte das espécies hidrolisadas para haver contato com as impurezas presentes na água (processo muito rápido, variando de 1/10 de segundo até 100 s), dependendo das demais características (pH, temperatura, concentração de impurezas). Estas duas etapas são realizadas na unidade de mistura rápida.

Destes dois processos em diante, há necessidade de agitação relativamente lenta, para que ocorram choques entre as impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores, denominadas FLOCOS, esta etapa é denominada de FLOCULAÇÃO.

A coagulação depende do: pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, sólidos dissolvidos, e tamanho e distribuição dos tamanhos das partículas no estado coloidal e em suspensão.

Os coagulantes podem ser classificados entre os de comportamento ácido (sulfato de alumínio, sulfato ferroso, cloreto férrico e sulfato férrico) e básico (aluminato de sódio).

PROPRIEDADES DOS COLÓIDES

Os colóides podem ser classificados quanto à sua estrutura eletrostática e molecular quando presentes na água:

Estáveis: moléculas de detergente ou sabão (micelas), proteínas, amidos e alguns polímeros de grande cadeia, não estão sujeitos à coagulação.

Instáveis: argilas, óxidos metálicos, microrganismos, etc., podem ser coagulados

Hidrófobos ou suspensóides: repelem as moléculas de água

Hidrófilos ou emulsóides: apresentam afinidade com a água

CARACTERÍSTICAS DAS ARGILAS

As argilas são representadas por argilominerais, matéria orgânica, mica, pirita, calcita, etc. Seus constituintes básicos são representados por silicatos hidratados de alumínio e ferro e alguns metais alcalinos e alcalinos terrosos.

A origem da estabilidade nas partículas coloidais e nas moléculas de substâncias húmicas estão associados a dois fenômenos:

a) estabilidade eletrostática

b) estabilidade estérica

Estabilidade eletrostática: capacidade de uma partícula ou molécula ao reagir com a água de se estabilizar doando ou recebendo prótons.

Pode ser do tipo:

a) Reação com a água

$$\equiv SiOH_2^+ \Leftrightarrow \equiv SiOH + H^+$$

$$\equiv SiOH \Leftrightarrow \equiv SiO^- + H^+$$

$$\equiv AlOH_2^+ \Leftrightarrow \equiv AlOH + H^+$$

$$\equiv AlOH \Leftrightarrow \equiv AlO^- + H^+$$

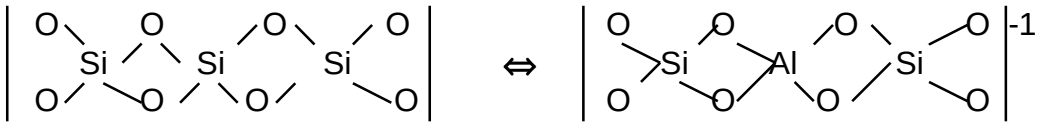
$$NH_3\text{-}R\text{-}COOH \Leftrightarrow NH_3\text{-}R\text{-}COO^- + H^+$$

Em geral quando o pH é > 2, a sílica torna-se negativa e em grupos carboxílicos e aminas tornam-se negativos em pH > 4.

b) Reação com outros íons

$SiOH + HPO_4^{2-} \Leftrightarrow SiOPO_3H^- + OH^-$

c) Interação isomórfica



Estabilidade estérica: resulta da adsorção de polímeros na superfície de partículas coloidais. Os polímeros adsorvidos tanto podem estabilizar como desestabilizar dependendo da quantidade de polímero e de partículas, da afinidade do polímero com a partícula e a água e o tipo e concentração de eletrólitos presentes.

MECANISMO DE UMA SUSPENSÃO COLOIDAL

A figura 6 apresenta o esquema de uma partícula coloidal negativa com uma nuvem de íons ao redor da mesma.

A **dupla camada, camada de Stern** ou **camada compacta** é representada pela aproximação de cargas positivas ao redor da superfície do colóide a qual possui carga elétrica negativa. A **camada difusa** resulta da aproximação de íons negativos na camada compacta que por sua vez atrai outros íons positivos. O potencial elétrico criado pela presença do colóide na água diminui com a distância, a partir da superfície do mesmo, onde é máximo é denominado de **potencial de Nerst**. O **potencial zeta** representa a magnitude da força repulsiva desenvolvida pela dupla camada.

Figura 6

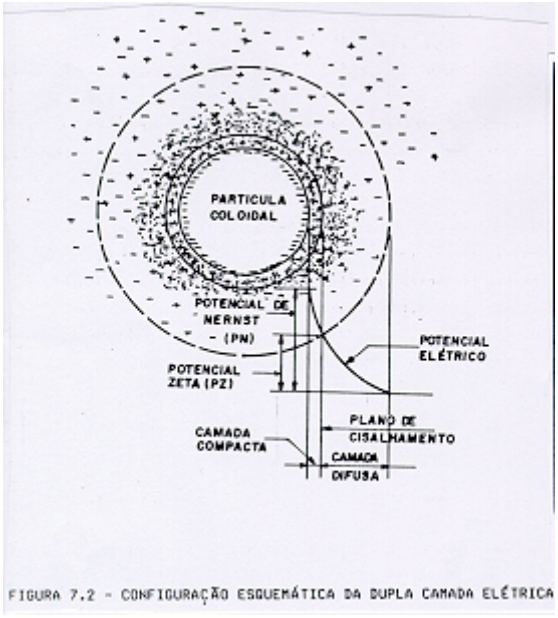


FIGURA 7.2 - CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA

Quanto maior a força iônica, menor a distância a partir da superfície do colóide e conseqüentemente maior o potencial elétrico. Quando dois colóides semelhantes se aproximam um do outro, ocorre interação entre as camadas difusas fazendo com que haja repulsão devida à **força eletrostática** entre os mesmos. Por outro lado, forças atrativas representadas pelas **forças de Van der Waals** resultarão em uma energia de atração inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as superfícies dos colóides. A interação entre as **forças de repulsão** de origem elétrica e de atração de **Van der Waals**, entre partículas coloidais, que se movem continuamente devido ao **movimento Browniano**, contribui para a estabilidade do sistema em suspensão. Quando a força iônica é pequena, a energia resultante é de repulsão, e atinge um valor máximo, conhecido como **barreira de energia**.

Com o aumento da força iônica, a energia resultante pode ser reduzida a ponto de eliminar a barreira de energia, de modo que as partículas podem ser aproximadas sem que haja repulsão entre elas.

O potencial zeta pode ser é calculado pela fórmula:

$$PZ = 4.\pi.\upsilon.v/D$$

onde:

PZ = potencial zeta existente;

υ = viscosidade cinemática;

v = velocidade eletroforética das partículas;

D = constante dielétrica do meio líquido

MECANISMOS DA COAGULAÇÃO

O processo de coagulação compreende quatro fenômenos físico-químicos:

1- Compressão da camada difusa

Consiste na Introdução de um eletrólito num sistema coloidal que causa um aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuição da esfera de influência das partículas. Concentrações elevadas de íons positivos e negativos na água acarretam um acréscimo do número de íons na camada difusa que, para manter-se eletricamente neutra, necessariamente, tem seu volume reduzido (diminuição da espessura), de modo tal que as **forças de Van der Waals** sejam dominantes, eliminando a **estabilização eletrostática**.

2- Adsorção e neutralização de carga

Neste tipo de desestabilização, as partículas presentes na água bruta adsorvem, em suas superfícies, produtos de hidrólise do alumínio capazes de neutralizá-las. A desestabilização por adsorção exige que a mistura rápida seja feita com muita energia e durante tempo muito pequeno. Os produtos da hidrólise do alumínio que podem ser adsorvidos ficam na água apenas durante alguns segundos (0,0001 a 1 s), ver figura 7.

3- Desestabilização por Varredura

Após a formação dos produtos da hidrólise do alumínio, ocorre a formação do precipitado de hidróxido de alumínio num tempo de cerca de 1 a 7 s. O $Al(OH)_3$ formado arrastará as partículas em suspensão na água, formando um floco de tamanho maior e com velocidades de sedimentação mais altas que os flocos formado no processo de adsorção.

4- Adsorção por coagulantes poliméricos

Adsorção realizada por compostos orgânicos sintéticos ou naturais, caracterizados por grandes cadeias moleculares, que gozam de propriedade de apresentar sítios ionizáveis ao longo da cadeia.

Os polímeros podem ser classificados como:

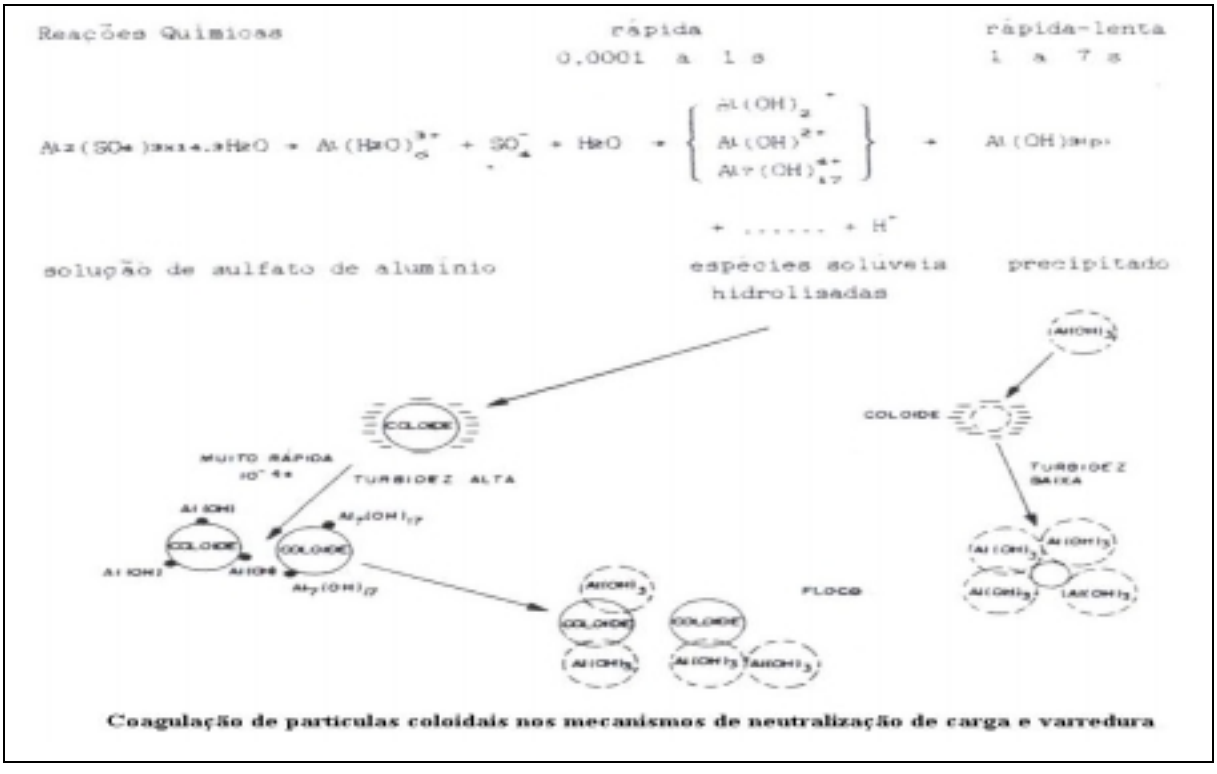
a) **Catiônico** (ex.: íon dialil-dimetil amônia, polietileno imina, polidialil-dimetil cloreto de amônia)

b) **Aniônicos** (ex: poliacrilato de sódio, ácido acrílico, poliestireno sulfonato de sódio)

c) **Não iônicos** (ex.: acrilamida, polivinil ácool, poliacrilamida)

d) **Anfolíticos**

Figura 7 – Mecanismos de Coagulação



Coagulação de particulas coloidais nos mecanismos de neutralização de carga e varredura

Coagulação Usando Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio tem sido o coagulante químico mais utilizado nas ETAs brasileiras. As suas principais vantagens são o preço e a operacionalidade, a principal desvantagem diz respeito ao residual de alumínio total em água, concentrações acima da norma (0,2 mg/L) podem produzir ressuspensão na água e causar danos à saúde humana e grupos vulneráveis (doentes renais).

A Química do Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio, quando em solução, encontra-se sob forma hidrolisada, não havendo formação de Al^{3+}

$$Al_2(SO_4)_3 + 12H_2O \rightarrow 2[Al(OH_2)_6]^{3+} + 3SO^{=}_4$$

Os íons de alumínio hidratados atuam como ácidos, reagindo com as substâncias alcalinas presentes na água e com a própria molécula da água. As substâncias alcalinas (OH^-, $CO^{=}_3$, $HCO^{=}_3$), sendo bases mais fortes que a água, o ìon de alumínio hidratado reagirá primeiramente com elas para posteriormente, reagir com a água. Portanto haverá um consumo dos compostos de natureza alcalina e um conseqüente decréscimo de valor do pH da água.

Reações com as Substâncias Alcalinas

$$2[Al(OH_2)_6]^{3+} + OH^- \rightarrow [Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + H_2O$$

$$2[Al(OH_2)_6]^{3+} + CO^{=}_3 \rightarrow [Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + HCO^-_3$$

$$2[Al(OH_2)_6]^{3+} + HCO^{=}_3 \rightarrow [Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + H_2CO_3$$

O complexo $[Al(OH_2)_5(OH)]^{2+}$ é instável e se hidrolisa rapidament substituindo 1 mol de H20 por um 1 íon OH-, da seguinte forma:

$$[Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} \rightarrow [Al(OH_2)_4(OH)_2]^{+} \rightarrow [Al(OH_2)_3(OH)_3$$

O produto final se apresenta como um hidróxido de alumínio insolúvel que precipita a um certo pH, podendo ser ele neutro ou dotado de carga negativa como na espécie $[Al(OH_2)_2(OH)_4]^-$.

Estas espécies monoméricas que contém um único íon de alumínio, se polimerizam reagindo entre si.

$$[Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + [Al(OH_2)(OH)]^{2+} \rightarrow [Al(OH_2)_8(OH)]^{2+} + 2H_2O$$

Estas reações de polimerização continuam como tempo formando compostos complexos, tais como:

$Al16(OH)15.Al8(OH)20$ $[Al(OH_2)_3(OH)_3]$ ou $[Al(OH_2)_2(OH)_4]^-$

Tanto os íons de alumínio hidratados, como os compostos polimerizados podem ser adsorvidos rapidamente pelas partículas contidas na água e no ponto crítico isoelétrico serem precipitados.

Reações com a Água

Após terem sido consumidas, as substâncias alcalinas da água, o íon de alumínio hidratado reage com a água, considerada como uma base fraca.

$$[Al(OH_2)_6]^{3+} + H_2O \rightarrow [Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + H_3O^+$$

$$[Al(OH_2)_5(OH)]^{2+} + H_2O \rightarrow [Al(OH_2)_4(OH)_2]^+ + H_3O^+$$

$$[Al(OH_2)_4(OH)_2]^+ + H_2O \rightarrow [Al(OH_2)_3(OH)_3] + H_3O^+$$

$$[Al(OH_2)_3(OH)_3] + H_2O \rightarrow [Al(OH_2)_2(OH)_4]^- + H_3O^+$$

O complexo $[Al(OH_2)_5(OH)]^2$ é instável e se hidrolisa para produzir hidróxidos hidratados e se combina para formar compostos polimerizados. Estas reações ocorrem num pH que varia de 5,7 a 8,0, o que corresponde a maioria dos casos na prática.

Ensaio de Floculação – Jar teste

As dosagens de sulfato de alumínio usadas variam com o pH, a alcalinidade, a turbidez, e o teor de sólidos. Considerando a qualidade das águas superficiais brutas brasileiras, elas variam de 5 a 50 mg/L, podendo atingir valores maiores quando em períodos chuvosos.

O ensaio consiste em colocar volumes determinados da água a ser tratada em seis *bechers*. Nestes são introduzidas palhetas que se movem simultaneamente acopladas a um motor elétrico com velocidade de rotação que varia de acordo como operador. O ensaio simula em condições de laboratório o que ocorre em escala real, ou seja, a mistura rápida, a a floculação e a decantação.

No inicio do teste, liga-se o motor imprimindo uma velocidade de rotação mais alta (simulando o gradiente de velocidade da mistura rápida) nas palhetas. Junta-se então o sulfato de alumínio, em geral em soluça de 0,1%, ou seja, 1g/L, previamente preparadas em doses crescentes, que em geral entre 5 e 50 mg/L, variando de 3 em 3mg/L ou de 5 em 5mg/L. esta variação depende muito da percepção que o operador tem sobra a qualidade da água bruta que aflui à estação.

Após a adição do coagulante (adição simultânea nos *bechers*) deve-se manter a agitação rápida durante 1 a 2 minutos, após este tempo diminui-se a velocidade de rotação, permitindo a formação dos flocos. Esta etapa de formação varia em torno de 15 a 20 minutos, quando então o motor é desligado, seguindo-se a fase de decantação dos flocos. Após 10 a 30 minutos de decantação verifica-se qual a água que se encontra mais clarificada e a dose correspondente.

Exemplo de um Ensaio de Floculação

Utilizando-se dos doados de uma ETA, tem-se:

Vazão da ETA – Q = 60 l/s

Capacidade do tanque de preparação do sulfato de alumínio = 1650 litros

Concentração da solução = 5%

Solução a 5%

50g de $Al_2(SO_4)_3$ ----------1000 mL de solução

Xg de $Al_2(SO_4)_3$ ----------1650 litros de solução

X = 82,5 Kg de $Al_2(SO_4)_3$

X = quantidade de sulfato de alumínio que deve ser adicionada ao tanque de 1650 L. nessa preparação do tanque de coagulante deve-se deixar bater durante 6 horas para homogeneizar bem a solução

Solução para o jar teste

Esta solução deve ser a 0,1% (1g/L) para se trabalhar com a leitura da bureta, ou seja:

1mL = 1mg (1000mg = 1000 mL)

solução a 5% (solução do tanque)
quanto se deve usar desta solução para se ter uma outra a 0,1% ?

50 g/L de $Al_2(SO_4)_3$ ----------1000 mL
1 g/L de $Al_2(SO_4)_3$ ----------Y mL

Y = 20 mL

Y é a quantidade correspondente ao volume da solução a 5% que deve ser diluída em 1 litro para se ter uma solução a 0,1% de sulfato de alumino. Assim, a solução terá 20 ml/L, representando uma solução de 0,1%

A partir desta solução a 0,1% retiram-se alíquotas para serem colocadas nos *bechers*. Desta forma, ao retirarmos 5 mL desta solução, teremos retirado 5 mg que diluídos em 1 litro fornecerá uma solução com concentração de 5mg/L, e assim por diante.

Deve-se colocar o agitador de palhetas com rotação que corresponda ao máximo grau de turbulência da mistura rápida da ETA (em geral em torno de 100 rpm). Após cerca de 1 a 2 minutos, deve-se diminuir a rotação para o nível da turbulência da floculação (em geral, cerca de 40 rpm) durante cerca de 15 minutos. Após esta etapa permite-se a formação e o adensamento dos flocos, em torno de 15 a 30 minutos.

Supondo que o *becher* que apresentou a melhor clarificação da água seja o que contém a dosagem de 10 mg/L, precisamos agora calcular a vazão de dosagem do dosador de sulfato, o que pode ser feito através da fórmula:

$$D = Q \times mg/L/C$$

Onde:

D = vazão do dosador de sulfato

Q = vazão da ETA

C = concentração da solução do tanque (5%)

mg/L = melhor concentração encontrada no jar teste

aplicando no exemplo citato, temos que:

$$D = 60l/s \times 10\ mg/L/50\ g/L$$

$$D = 0{,}012\ L/s = 12\ ml/s$$

Logo, se em um segundo usa-se 12 mL da solução do tanque, em 10 segundos usaremos 120 mL desta solução (120 mL/10 s). Em geral os dosadores trabalham com tempo de 10 s, porque 1 s é um tempo muito pequeno para se detectar.

TEORIA DA MISTURA RÁPIDA

É um processo físico mecânico no qual a água é agitada para que nela se criem gradientes de velocidade que definam a intensidade da agitação, a mistura rápida também serve para promover a dispersão do coagulante na água.

Principais fatores que influenciam a mistura

1-O tempo de mistura do coagulante na água, que precisa ser extremamente curto (frações de segundo);

2- A intensidade da agitação deve ser elevada de tal modo que permita assegurar dentro do tempo de reação a completa dispersão do coagulante na água.

O CONCEITO DE GRADIENTE DE VELOCIDADE

Foi definido pela vez por Smoluchowski em 1917, através da equação:

$$J_{ij} = 4/3.n_i.n_j.\ (Y_{ij})^3.dv/dy$$

Onde:

J_{ij} = número de colisões por unidade de tempo entre as partículas i e as partículas j

$n_i.n_j$.= concentração de partículas i e j

Y_{ij} = distância de colisão igual à soma dos raios das partículas

dv/dy = gradiente de velocidade

O **gradiente de velocidade** representa em termos físicos, o número de oportunidades de colisões em um determinado tempo, que duas partículas experimentam, em função de uma energia externa fornecida ao sistema, o qual se encontram as partículas.

Para um Líquido newtoniano, a tensão de cisalhamento pode ser definida pela equação:

$$\tau = \mu . dv/dy \quad (1)$$

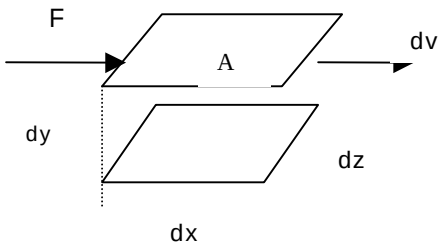
Onde

τ - tensão de cisalhamento;

μ - viscosidade absoluta do líquido;

dv/dy – o gradiente de velocidade

Podemos representar essa tensão através da figura abaixo:



Sendo P a potência aplicada por unidade de volume, podemos escrever:

$$P = F/A = \tau = \mu . dv/dy \quad - \quad F/A dy = \mu . dv \quad \int \quad F/A \; y = \mu . v$$

$$v.F/A \; y = \mu . v . v \quad \rightarrow \quad F.v = A.\mu v^2/y \rightarrow F.d/t = A.\mu . v^2/y$$

$$P = x.y.z.\mu . v^2/y^2$$

Mas x.y.z = V – volume do elemento do fluido e x/y =G (gradiente de velocidade) – logo:

$$P = V.\mu . G^2 \quad \rightarrow \quad \boxed{G = (P/\mu . V)^{1/2}}$$

Onde:

P = Potência dissipada por unidade de volume;

V = Volume onde ocorre a dissipação

MISTURA RÁPIDA

A mistura deve ser efetuada em local de transmissão de grande energia à massa líquida, e no menor tempo possível, em vista da rapidez com que as reações de desestabilização se processam

A norma NBR 12216 da ABNT estabelece os seguintes dispositivos para uma unidade de mistura rápida.

a) qualquer trecho ou seção de canal ou canalização que produza perda de carga compatível com as condições desejadas, em termos de gradiente de velocidade;

b) difusores que produzam jatos da solução de coagulante, aplicados no interior da água;

c) agitadores mecanizados;

d) entrada de bombas centrífugas

Podem ainda ser utilizados como dispositivos hidráulicos de mistura:

a) qualquer singularidade onde ocorra turbulência interna;

b) canal ou canalização com anteparos ou chicanas;

c) ressalto hidráulico

TIPOS DE MISTURADORES

Hidráulicos

- Calha Parshall
- Ressalto Hidráulico ou Vertedouro
- Difusores ou Malhas Difusoras

Mecanizados

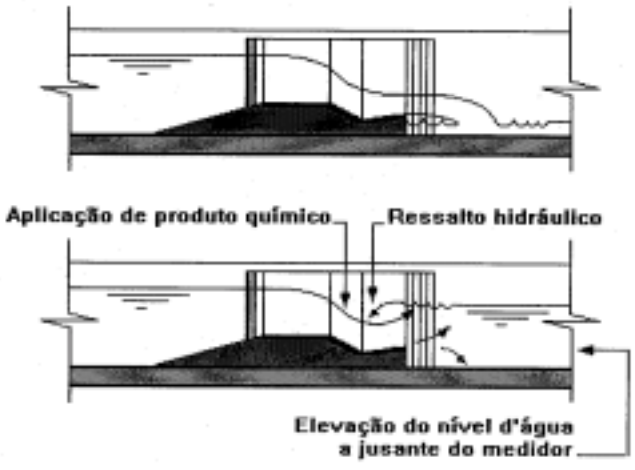
Escoamento radial

- Turbinas de paletas planas
- Turbinas de paletas curvas

Escoamento axial

- Turbinas de paletas inclinadas
- Hélice propulsora

Calha Parshall - é um medidor de vazão de regime crítico. Onde ao se fazer com que o regime de escoamento passe de subcrítico para crítico, é possível estabelecer uma relação matemática entre a altura da lâmina d'água a montante da seção em que o regime é crítico e a vazão que está escoando.



O Parshall sem e com Ressalto a Jusante

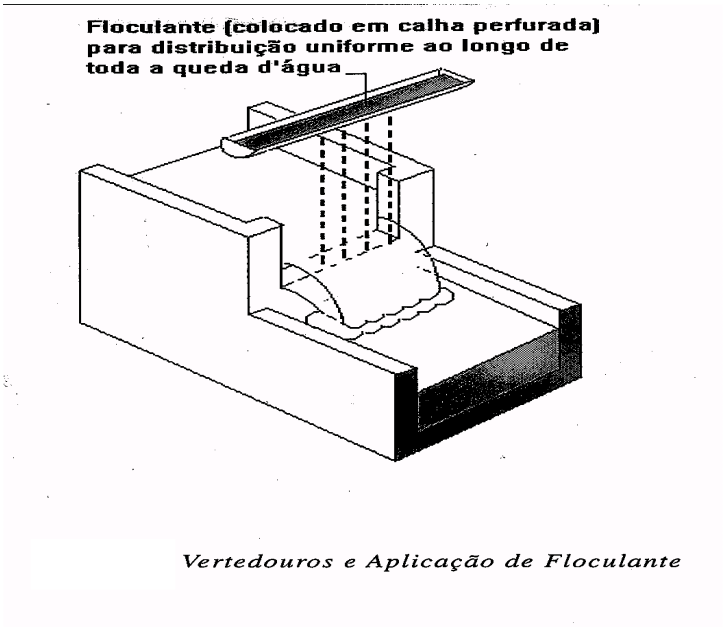
Algumas desvantagens da Calha Parshall:

- Afogamento do Parshall
- Não obtenção de ressaltos verdadeiros
- Possibilidade de retromistura, devido à formação de rolo no ressalto

Diretrizes para a seleção do medidor Parshall adequado à mistura

1- A lâmina d'água na garganta deve ser a menor possível, isto significa utilizar o maior Parshall possível;
2- Prever recursos para induzir a formação de ressalto hidráulico.

Gradientes de velocidade para misturadores hidráulicos (Parshall e Ressalto)



Vertedouros e Aplicação de Floculante

$$G = [Q.\gamma.\ h\ /\ \mu.V]^{1/2}$$

onde:

no sistema MK_fS

G = gradiente de velocidade (s^{-1})

Q = vazão (m^3/s)

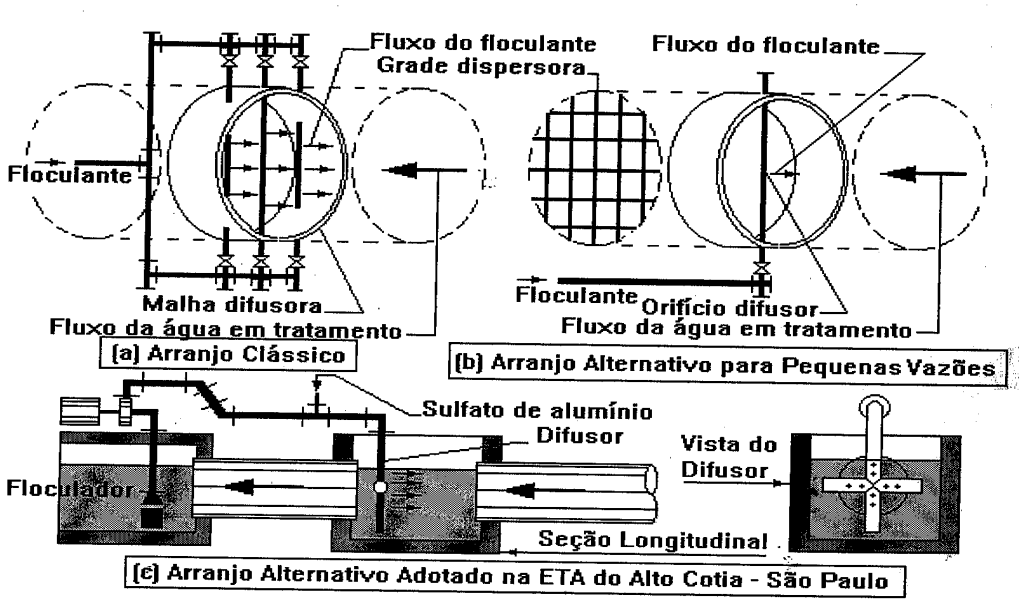
γ = peso específico da água (1000 kgf/m^3)

μ = viscosidade absoluta (10^{-4} kgf.s/m^2)

V = volume (m^3)

Difusores ou malhas difusoras

São dispositivos destinados exclusivamente à mistura rápida. Ao contrário dos medidores Parshall e vertedores, não desempenham o papel de misturadores e medidores de vazão.

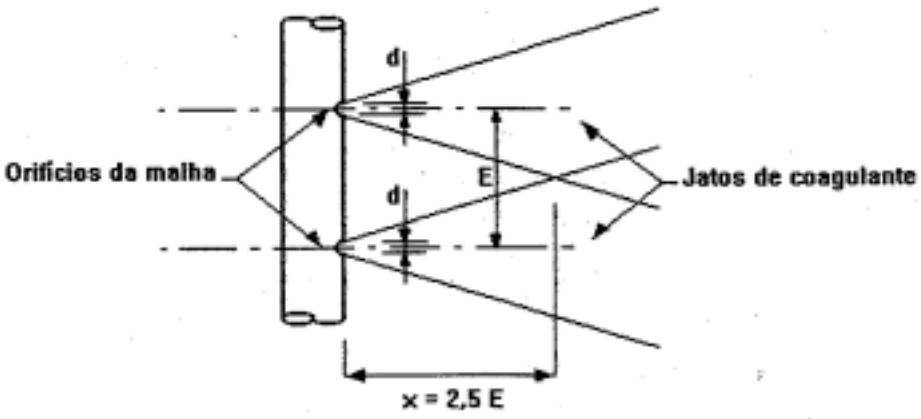


Malhas Difusoras

Gradientes de velocidade para difusores

$$G = \sqrt{\frac{\gamma\,(S_o.v_o)N.(v_o + v_c)^2/2.g}{\mu.V}}$$

e o volume pode ser calculado pela equação proposta por Azevedo Netto



Distância para Dissipação da Energia dos Jatos Originários das Malhas Difusoras

$$V = 2{,}5 \cdot A \cdot E$$

onde:

γ - peso específico da água (kgf / m^3)

So = área da seção transversal do orifício (m^2)

vo = velocidade média do jato d'água de cada orifício (m / s)

N = número de orifícios

vc = velocidade média da corrente líquida (m / s)

g = aceleração da gravidade (9,8 m / s^2)

μ - viscosidade absoluta (kgf.s / m^2)

V = volume onde ocorre a mistura (m^3)

A = área do reator (m^2)

E = espaçamento entre os orifícios

Recomendações da NBR 12216 para Difusores:

a) a aplicação da solução de coagulante deve ser uniforme, distribuídas através dos jatos no sentido contrário do fluxo;

b) a área da seção transversal de cada jato não deve ser maior que 200 cm^2 por orifício e sua dimensão máxima não deve ultrapassar 20 cm;

c) a velocidade da água onde os jatos são distribuídos deves ser igual ou superior a 2m/s;

d) os orifícios de saída dos jatos devem ter diâmetro igual ou superior a 3 mm;

e) o sistema difusor deve permitir limpezas periódicas nas tubulações que distribuem a solução coagulante.

Misturadores Mecanizados

Os misturadores mecânicos devem obedecer as seguintes condições segundo a NBR 12216

a) Potência deve ser estabelecida em função do gradiente de velocidade;

b) Tempo de detenção inferior a 2s exige que o fluxo incida diretamente sobre as pás do agitador;

c) O coagulante deve ser introduzido logo abaixo da turbina ou hélice do agitador.

Gradiente de velocidade para misturadores mecanizados

$$G = \sqrt{\frac{N_p.\eta^3.\rho.D^5}{\mu.V}}$$

Onde:

N_p = Número de Potência

ρ = densidade da água

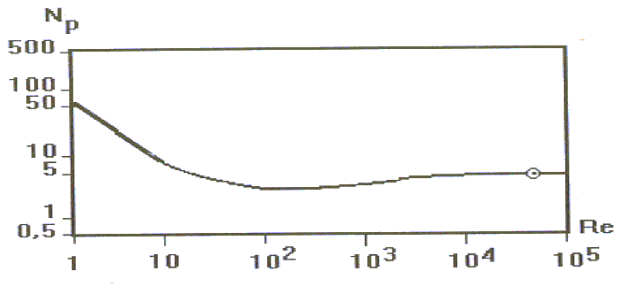
η = rotações por minuto

μ = viscosidade da água

D = diâmetro do rotor

V = volume do tanque de mistura

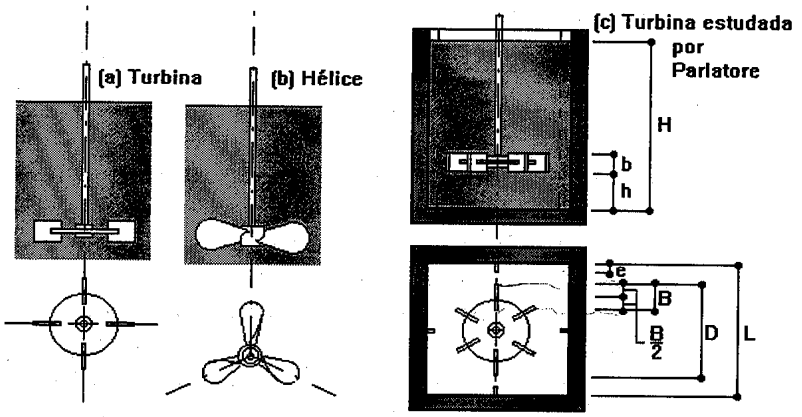
para Re > 10.000 - regime turbulento



Número de Reynolds x Número de Potência

$$N_p = 5$$

$$N_p = \frac{P}{\rho^3 . \eta . D^5}$$



Relações Geométricas da Turbina Estudada por Parlatore		
2,7 ≤ L/D ≤ 3,3	2,7 ≤ H/D ≤ 3,9	0,75 ≤ h/D ≤ 1,3
B = D/4	b = D/5	e/D = 0,10

Turbinas e Hélices

FLOCULAÇÃO

Smoluchowski demonstrou que os choques entre as partículas coloidais suspensas num líquido, após a coagulação, resultam de movimentos ortocinéticos e pericinéticos, onde:

Movimentos Ortocinéticos: são aqueles decorrentes da introdução de energia de externa; e

Movimentos Pericinéticos: decorrem do movimento Browniano e da ação da gravidade, que faz com que as partículas, ao caírem, se choquem e se aglomerem.

Através da mesma equação utilizada na definição da mistura rápida, Smoluchowski

$$J_{ij} = 4/3.n_i.n_j.\ (Y_{ij})^3.dv/dy$$

Onde:

J_{ij} = número de colisões por unidade de tempo entre as partículas i e as partículas j

$n_i.n_j$.= concentração de partículas i e j

Y_{ij} = distância de colisão igual à soma dos raios das partículas

dv/dy = gradiente de velocidade

ou $$J_{ij} = 4/3.n_i.n_j.\ (Y_{ij})^3.G$$

mas $G = (P/\mu V)^{1/2}$ então

$$J_{ij} = 4/3.n_i.n_j.\ (Y_{ij})^3.\ (P/\mu V)^{1/2}$$

A fração de partículas floculadas, em uma unidade de floculação foi definida por Campos e Povinelli, através da seguinte equação:

$$N_t / N_o = e^{-G.t.\phi.V/\pi}$$

Onde:

N_o = número de partículas inicialmente em suspensão (turbidez antes da floculação);

N_t = número de partículas livres existentes após a floculação;

G = gradiente de velocidade introduzido na massa líquida;

V = volume dos flocos existentes na unidade de volume de água;

ϕ = constante, denominada razão de adesão, correspondente à fração das partículas iniciais que se unem em virtude das colisões;

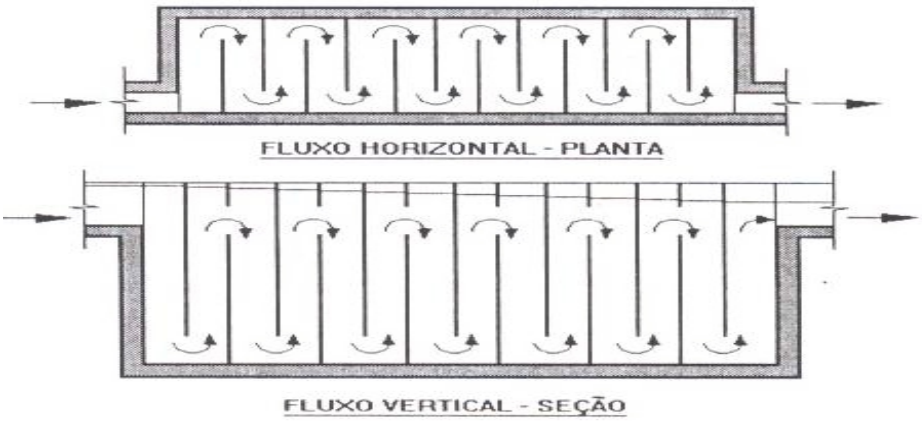
t = tempo de agitação das partículas

Obs: o produto **G.t** é uma medida adimensional que prevê a oportunidade de choques entre as partículas, e é chamada de **Número de Camp**.

Tipos de Floculadores

Floculadores Hidráulicos: fazem com que a água percorra um caminho com mudanças de direção, e a energia necessária para a formação dos flocos é obtida através da perda de carga resultante desse percurso. Os tipos mais encontrados:

Floculadores Hidráulicos 11 – chicanas horizontais e verticais



Floculador de Chicanas

a- Chicanas horizontais

b- Chicanas verticais

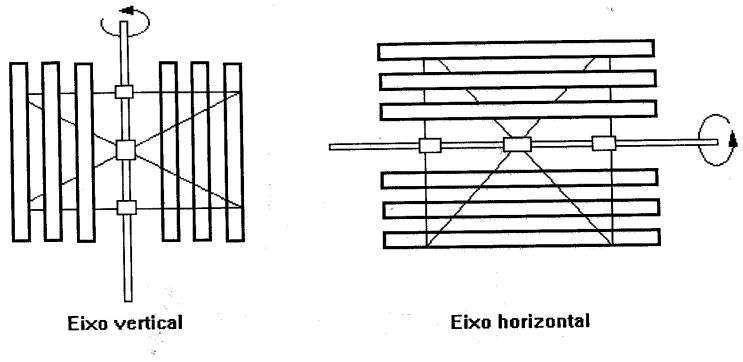
c- Tipo Cox

d- Tipo Alabama

e- Bandejas perfuradas

f- Meio granular

Floculadores Mecanizados: são capazes de manter a água em constante agitação, através de equipamentos mecânicos, são encontrados os seguintes tipos:



Agitadores Mecanizados do Tipo de Paletas

a- Paletas de eixo vertical

b- Paleta única de eixo vertical

c- Paletas de eixo horizontal

d- Paletas de câmaras superpostas

Normas da NBR 12216 para projetos de floculadores

1- **G** e **t** a serem aplicados devem ser determinados por meio de ensaios realizados com a água a ser tratada.

2- Não sendo possível proceder aos ensaios destinados a determinar o período de detenção adequado, podem ser adotados valores entre **20 e 30**

minutos para floculadores hidráulicos, e entre **30 e 40 minutos**, para os mecanizados.

3- Não sendo realizados ensaios, deve ser previsto G máximo, no primeiro compartimento de **70 s^{-1}** e mínimo, no último, de **10 s^{-1}**.

4- Deve ser previsto dispositivo que possa alterar o gradiente de velocidade aplicado, ajustando-o às características da água e permitindo variação de pelo menos **20 %** a mais e amenos do fixado para o compartimento.

5- Os tanques de floculação devem ser providos de descarga com diâmetro mínimo de **150 mm** e fundo com declividade mínima de **1 %**, na direção desta.

6- Os tanques de floculação devem apresentar a maior parte da sua superfície livre exposta, de modo a facilitar o exame do processo.

7- A velocidade da água ao longo dos canais deve ficar entre 10 cm/s e 30 cm/s

8- O espaçamento mínimo entre chicanas deve ser de 0,60 m, podendo ser menor, desde que elas sejam dotadas de dispositivos para sua fácil remoção.

A escolha do tipo de sistema de floculação está condicionada a diversos fatores:

a) qualidade da água;
b) mecanismo de coagulação;
c) tamanho das unidades;
d) existência de pessoal qualificado para operação e manutenção;
e) regime de funcionamento (vazão constante ou variável, contínuo ou intermitente).

Algumas desvantagens dos sistemas hidráulicos:

1- pouca flexibilidade em relação à variação de vazão;
2- impossibilidade de variar ou ajustar o gradiente de velocidade;
3- perda de carga relativamente alta;

Por outro lado apresentam as seguintes vantagens:

1- custo menor de implantação, operação e manutenção;
2- não exige pessoal qualificado para operação e manutenção

Projetos de Unidades Hidráulicas - Unidades do tipo Chicana

A energia necessária para promover a floculação em canais com chicanas decorre, basicamente da perda de carga na voltas, por ser muito pequena a resistência por atrito nas paredes. Conhecendo-se a perda de carga total num trecho qualquer do canal, é possível estimar-se o gradiente de velocidade médio no trecho considerado. No projeto de sistemas de floculação por chicanas, são usados os seguintes parâmetros:

a) tempo de floculação = 20 a 30 minutos (sem estudos laboratoriais);
b) velocidade de escoamento v_{e1} = 0,1 e 0,3 m/s
c) velocidade de escoamento v_{e2} = 2/3 de v_{e1};
d) espaçamento entre chicanas = 0,5 m (no mínimo) para escoamento vertical e podendo ser menor em escoamento horizontal.

Perda de Carga e Gradiente de Velocidade em Sistemas de Chicanas

Em um canal provido de chicanas a perda de carga é devida à:

a) mudança de direção do escoamento;
b) ao alargamento e à contração da seção de escoamento nas voltas;
c) ao atrito da água com as paredes.

De acordo com Fair, Geyer e Okun, a perda de carga para os itens (a) e (b) pode ser calculada pela fórmula:

$$h_f = \frac{N_c . v_{e1}^2 + (N_c - 1) \times v_{e2}^2}{2.g}$$

Onde:

h_f = perda de carga (m)

N_c = número de chicanas igualmente espaçadas

v_{e1} = velocidade média entre chicanas (m/s)

v_{e2} = velocidade média de escoamento nas voltas (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

A perda de carga por atrito pode ser calculada pela fórmula de Manning:

$$h_a = L.J = \frac{(v_{e1}.\ n)^2.L}{R_h^{4/3}}$$

onde:

h_a = perda de carga por atrito (m)

L = percurso total percorrido pela água (m)

J = gradiente hidráulico (m/m)

n = coeficiente de Manning (0,0013 para concreto e 0,011 para madeira)

R_h = raio hidráulico (m)

A perda de carga total é dada pela soma de h_f e h_a

$$h_t = h_f + h_a$$

E o gradiente de velocidade pode ser calculado pela fórmula:

$$G = (P/\mu.V)^{1/2}$$

Omde P representa a potência de correntes líquidas, e dada pela equação:

$$P = Q.\gamma.h_t$$

Para floculadores hidráulicos de chicanas verticais:

h_a é insignificante, logo $h_t = h_f$

assim: $$P = Q.\gamma.\frac{N_c.v_{e1}^2 + (N_c - 1) \times v_{e2}^2}{2.g}$$

$$\boxed{G = \frac{Q.\gamma.N_c.v_{e1}^2 + (N_c - 1) \times v_{e2}^2}{2.g.\mu.V}}$$

Para floculadores hidráulicos de chicanas horizontais:

h_f é muito baixo, assim $h_t = h_a$

então a perda de carga se dá principalmente pela fórmula:

$$h_a = L.J = \frac{(v_{e1}.\ n)^2.L}{R_h^{4/3}}$$

O potencial da corrente líquida no escoamento horizontal será:

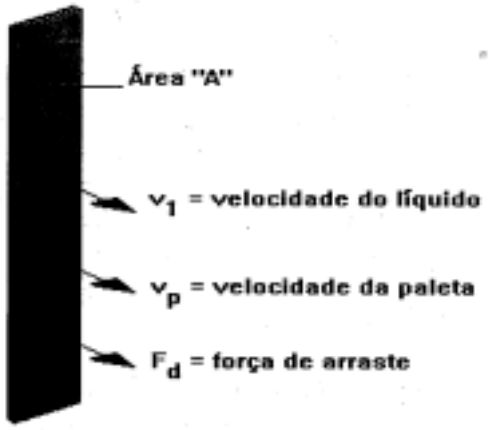
$$P = Q.\gamma.h_a$$

$$P = \frac{Q.\gamma.\ (v_{e1}.\ n)^2.L}{R_h^{4/3}}$$

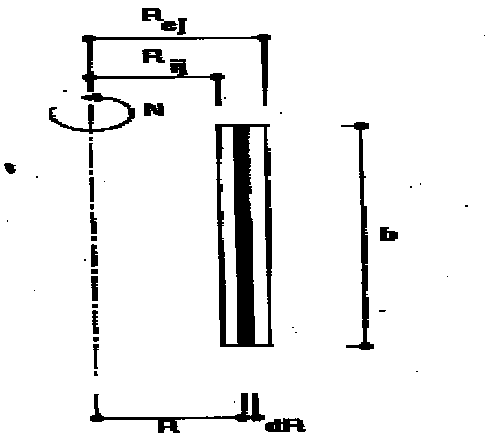
O gradiente de velocidade será então:

$$G = \sqrt{\frac{Q.\gamma.\ (v_{e1}.\ n)^2.L}{\mu.V.R_h^{4/3}}}$$

Potência Dissipada e Gradiente de Velocidade em Floculadores Mecanizados



Força de Arraste Devida a uma Paleta em Movimento



Força de Arraste: Expressão Diferencial

$$F_d = C_d.A.\rho.v^2 / 2 = Cd.A.\gamma.v^2 / 2g$$

onde:

F_d = força de arraste;

C_d = coeficiente de arraste;

A = Área das paletas;

ρ = massa específica do fluído;

v = velocidade do obstáculo em relação ao fluido.

$$F_d = C_d.A.\rho.(v_p - v_l)^2 / 2$$

onde:

v_p = velocidade da paleta

v_l = velocidade da água

sendo **$v_l = k.v_p$**

$$F_d = C_d.A.\rho.[v_p\,(1-k)]^2/2$$

se P = F.v

$P = F_d.v_p\,(1-k)$

$$P = C_d.A.\rho.1/2.[v_p\,(1-k)]^3$$

Floculador Mecanizado de Eixo Vertical e Horizontal

Seja:

N = rotação em RPM;

R_{ej} = distância do eixo à extremidade externa da paleta;

R_{ij} = distância do eixo à extremidade interna da paleta;

b = comprimento da paleta.

Sendo a área infinitesimal da paleta igual a:

$dA = b.dR$

e a velocidade da área elementar da paleta em relação ao tanque:

$v_p = \omega_p.R = 2\pi.N.1/60.R$

A potência em termos diferenciais será:

$dP = C_d\,(b/dR).\rho/2.(1-k)^3.(\,2\pi.N.1/60.R)_3$ $\xrightarrow{\int}$

$$P = \gamma/2.g\ (2\pi/60)3.C_d.b\ [(1-k).N]^3.\ \int_{Rij}^{Rej} R^3 \cdot dR$$

fazendo g = 9,8 m/s2,

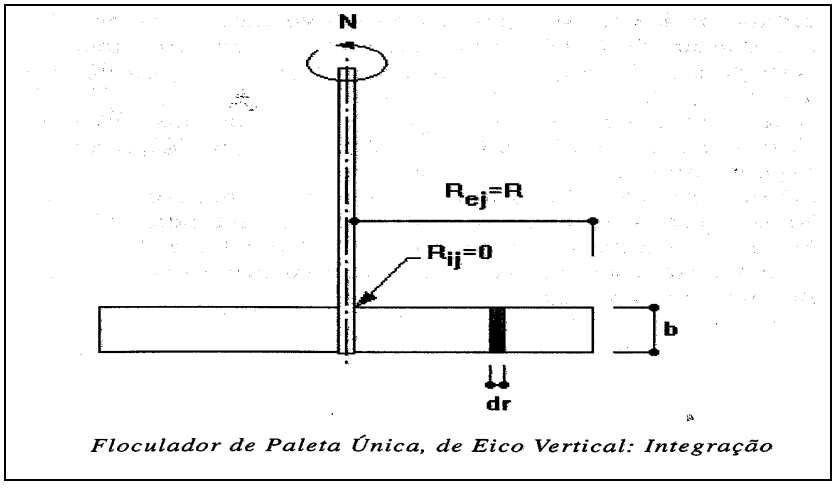
$$P = (5{,}859 \times 10^{-5}).C_d.\gamma.b.[(1-k)]^3.\ (R_{ej}^4 - R_{ij}^4)/4$$

$$\boxed{P = (1{,}465 \times 10^{-5}).C_d.\gamma.b.[(1-k)]^3.\ (R_{ej}^4 - R_{ij}^4)}$$

Para n paletas, B = número de braços do agitador, a expressão fica:

$$\boxed{P = (1{,}465 \times 10^{-5}).C_d.\gamma.b.[(1-k)]^3.\Sigma\ (R_{ej}^4 - R_{ij}^4).B.}$$

Para floculador mecanizado de paleta única e eixo vertical:



Floculador de Paleta Única, de Eico Vertical: Integração

$$\boxed{P = (2{,}93 \times 10^{-5}).C_d.\gamma.b.[(1-k)]^3.\ R^4}$$

São recomendados os seguintes valores de C_d para o produto b (R_{ej} - R_{ij})

$b / (R_{ej} - R_{ij})$	C_d*
1	1,10
2	1.15
4	1,19
10	1,29
18	1,40
∞	2,01

*** como primeira aproximação, Fair Geyer e Okum recomendam adotar**

C_d = 1,8

Valores a serem adotados para floculadores mecanizados

Para valores de **k** usar **0,24** para rotações de **2** a **5,2 RPM** e **0,32** para rotações de **1,1 a 2,0 RPM**, em geral o valor de **k** utilizado têm sido de **0,25**.

A velocidade periférica das paletas não deve ultrapassar **75 cm/s**.

A soma das áreas de todas as paletas não deve ser superior a **20 %** da área da seção transversal da câmara.

Para floculadores de paletas verticais, as bordas superior e inferior devem situar-se entre **0,15 m e 0,40 m** da superfície da água e do fundo do tanque, respectivamente.

Para floculadores de paletas horizontais, a distância deve ser de no mínimo **0,40** m para a parede do tanque.

O diâmetro do equipamento deve estar entre **80 e 90 %** da largura da câmara (para floculadores verticais) e ou da profundidade da câmara para floculadores horizontais.

Agitadores do Tipo de Fluxo Axial – Turbinas e Hélices

Nesse tipo de floculador a água é introduzida numa série de câmaras, em geral em número de três. Ma primeira delas, o gradiente de velocidade é mais intenso, que na segunda, por sua vez o gradiente na segunda é mais intenso que na terceira.

O gradiente de velocidade depende da rotação do eixo e das características da hélice ou turbina. Os eixos são movimentados por conjuntos motor-redutor ou motores com variadores de freqüência.

O número de potência é dado pela equação:

$$N_p = P / n^3.\rho.D^5$$

Onde:

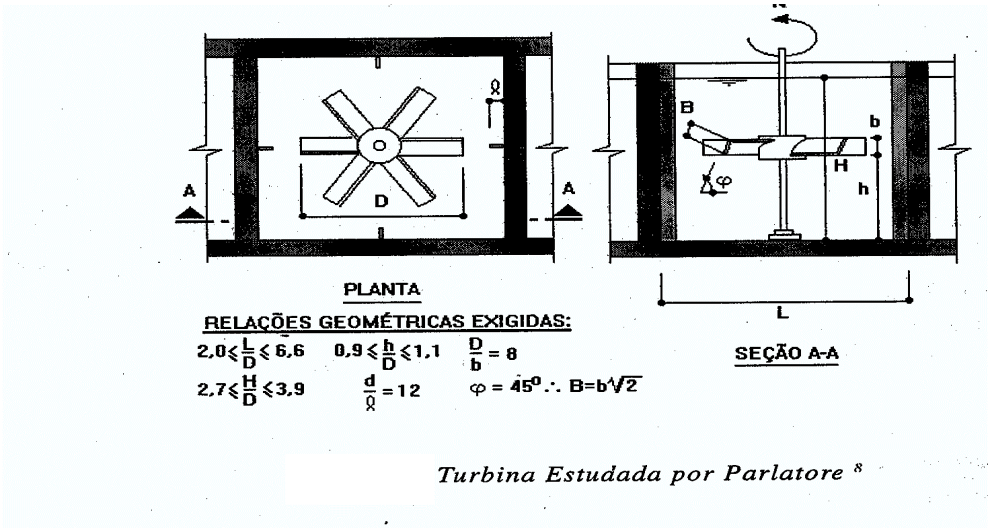
P – Potência do motor – Kgf.m/s

N – velocidade em rotações por segundo – m/s^2

ρ - densidade da água – $Kgf.m^{-4}.s^2$

D – Diâmetro da turbina - m

E caso as condições estabelecidas para a turbina de Parlatore sejam verificadas, o $N_p = 1,3$.



Turbina Estudada por Parlatore [8]